

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie
zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenské metalurgie

Precipitační vytvrzování odlitků ze slitin hliníku

Precipitation hardening of castings from aluminium alloys

Tomáš Krejčí

KSP – SM – B18

Vedoucí bakalářské práce: Prof. Ing. Iva Nová, CSc. – TU v Liberci

Konzultant bakalářské práce: Ing. Iva Nováková, - TU v Liberci

Rozvrh práce a příloh:

Počet stran	34
Počet tabulek	4
Počet příloh	2
Počet obrázků	16

Datum: 5.6. 2009

Zadání

A N O T A C E

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: B2341 – Strojírenství

Student: Tomáš Krejčí

Téma práce: Precipitační vytvrzování odlitků ze slitin hliníku

Precipitation hardening of castings from aluminium alloys

Číslo BP: KSP – SM – B18

Vedoucí BP: Prof. Ing. Iva Nová, CSc. – TU v Liberci

Konzultant: Ing. Iva Nováková, - TU v Liberci

Abstrakt:

Tato bakalářská práce pojednává o precipitačním vytvrzování hliníkových slitin. Práce je rešeršního charakteru. Jsou v ní popsány vlastnosti hliníku a jeho slitin, přehled slitin hliníku rozdělených na vytvrditelné a nevytvrditelné a fyzikálně-metalurgická podstata vytvrzování.

Abstract:

This bachelor thesis deals with precipitation hardening of aluminum alloys. The work is of searching character. There are property descriptions of aluminum and its alloys, summary of aluminum alloys divided to hardenable and unhardenable and physical-metallurgical principle of hardening.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 5.6.2009

.....
Tomáš Krejčí
Sokolovská ul.730/8
460 14 Liberec 14

Poděkování

Děkuji své vedoucí bakalářské práce paní prof. Ing. Ivě Nové, CSc. a konzultantce Ing. Ivě Novákové za odborné vedení a cenné rady, které pomohly při vypracovávání této práce.

OBSAH

1. ÚVOD.....	7
2. REŠERČNÍ ČÁST PRÁCE	8
2.1 Hliník a jeho vlastnosti	8
2.2 Slitiny hliníku	10
2.2.1 Slévárenské slitiny hliníku.....	15
2.2.2 Přehled slévárenských slitin hliníku	16
2.3 Vytvrzování slitin hliníku	19
2.3.1 Fyzikálně metalurgická podstata vytvrzování	21
Homogenizační ohřev	22
Ochlazení	23
Precipitační vytvrzování (stárnutí).....	24
2.3.2 Průmyslové uplatnění precipitačního vytvrzování	27
3. ZÁVĚR.....	29
4. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	20
SEZNAM PŘÍLOH	31

1. ÚVOD

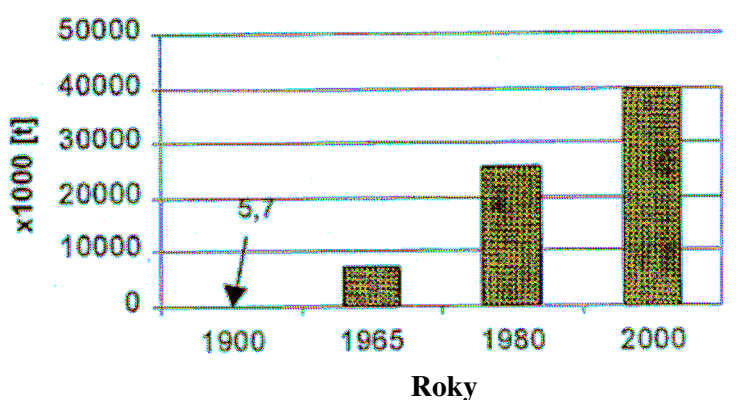
Hliník je nejrozšířenějším kovem v zemské kůře. V současné době je nejpoužívanějším kovem hned po železe a to především díky svým výhodným fyzikálním a technologickým vlastnostem. Mezi hlavní přednosti hliníku patří především nízká měrná hmotnost, poměrně dobrá pevnost, dobrá tepelná vodivost a odolnost proti korozi. Mezi hlavní obory, kde se využívá hliník a jeho slitiny, patří elektrotechnický průmysl, chemický a potravinářský průmysl. Největší uplatnění hliníkových slitin nalezneme ale v automobilovém a leteckém průmyslu, což souvisí s již zmiňovanými vlastnostmi především ale s příznivou kombinací hmotnosti (hliníková karoserie je v průměru o 40% lehčí v porovnání se stejnou karoserií vyrobenou z oceli), pevnosti a odolnosti proti korozi.

Mechanické vlastnosti čistého hliníku jsou ovšem špatné a proto se nehodí pro praktické využití. Z tohoto důvodu se hliník leguje dalšími prvky, které podstatně tyto vlastnosti zvyšují. Různou kombinací legujících prvků vznikají různé slitiny. Některé z nich se pro dosažení co nejlepších mechanických vlastností dále tepelně zpracovávají a to tzv. vytvrzováním. Vytvrzování je nejdůležitější způsob tepelného zpracování hliníkových slitin a používá se zejména u odlitků litých do pískových forem, kovových forem nebo u odlitků vyrobených nízkotlakým litím. Tepelné zpracování hliníkových slitin se používá zejména pro zvýšení mechanických vlastností, zlepšení obrobitelnosti a korozní odolnosti. Ovšem některé odlitky ze slitin hliníku se používají v tepelně nezpracovaném stavu, např. odlitky ze slitin o eutektickém složení lité gravitačním způsobem a tlakově lité odlitky. Jak již bylo zmíněno, vytvrzování je nejdůležitější způsob tepelného zpracování hliníkových slitin a této problematice se věnuje tato bakalářská práce.

2. REŠERČNÍ ČÁST PRÁCE

2.1 Hliník a jeho vlastnosti [2]

Hliník byl objeven koncem 18. století, výroba byla patentována v roce 1886, ale průmyslová výroba byla zahájena až v roce 1890.



Obr. 1 Nárůst výroby hliníku do roku 2000 [7]

Hliník je v přírodě jeden z nejrozšířenějších kovů. V zemské kůře se vyskytuje v objemu asi 8% a to vázaný ve sloučeninách, jako jsou bauxit, kryolit, korund, spinely, kaolin atd. Základní surovinou pro výrobu hliníku je bauxit. Bauxit je nerost na bázi hydroxidu hlinitého, s obsahem oxidů železa, křemíku a titanu, v němž obsah Al_2O_3 bývá 50%. Hliník je vyráběn i z dalších nerostů, které jsou ovšem na jeho obsah mnohem chudší (např. nefelin, kaolin atd.). Z bauxitu se hliník získává elektrolýzou roztoku oxidu hlinitého v roztavených fluoridech. Celý výrobní proces je poměrně složitý a sestává se ze dvou zásadních etap:

1. Výroby oxidu hlinitého z hlinitanových rud - proces sestává z mletí, chemického zpracování hlinitanových rud loužením a následného žíhání na $1200 - 1300^\circ\text{C}$;
2. redukce oxidů na kovový hliník elektrolytickým způsobem z elektrolytu, kterým je roztavený kryolit (Na_3AlF_6) a v něm rozpuštěný oxid hlinitý (Al_2O_3), při teplotě $950 - 970^\circ\text{C}$.

Výroba hliníku z primárních surovin je energeticky velmi náročná. K výrobě 1 t hliníku se spotřebuje asi 4 t bauxitu, cca 20 GJ tepelné energie a asi 14 MWh elektrické energie. Získaný hliník má vysokou čistotu až 99,9%.

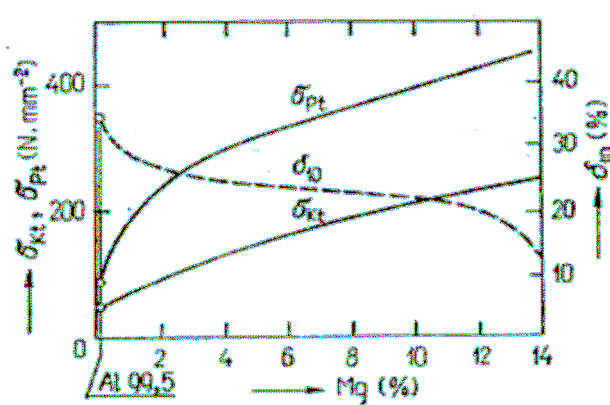
V tabulce 1 jsou uvedeny fyzikální a chemické vlastnosti čistého hliníku, dle [2], [7].

Tab. 1 Přehled fyzikálních a chemických vlastností hliníku

Krystalická mřížka	$a = 4,05 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
Atomové číslo	13
Atomová hmotnost	26,98
Teplota tání	660°C
Teplota vypařování	2520°C
Skupenské teplo tání	396 kJ.kg ⁻¹
Hustota	2700 kg. m ⁻³
Součinitel měrné tepelné kapacity (20°C)	0,9 kJ.kg.K ⁻¹
Součinitel tepelné roztažnosti	23.10 ⁻⁶ K ⁻¹
Součinitel tepelné vodivosti (20°C)	235 W. m ⁻¹ . K ⁻¹
Součinitel elektrické vodivosti	2,6. 10 ⁻⁸ Ω.m

Pokud jsou sledovány další vlastnosti čistého hliníku, pak je možno je charakterizovat následovně.

Mechanické vlastnosti čistého hliníku jsou špatné, ale má velmi dobré plastické vlastnosti, viz tab. 2. Jako konstrukční materiál je čistý hliník prakticky nepoužitelný. Legující prvky zvyšují pevnostní charakteristiky asi 10x. Legováním se mechanické vlastnosti výrazně zvyšují, např. u slitin Al-Mg už poměrně malou přísadou hořčíku vzrůstá mez kluzu i pevnost v tahu, přičemž tažnost se zprvu mění jen málo, pokles nastává až při obsahu nad 10%.



Obr. 2 Závislost mechanických vlastností slitin Al-Mg na obsahu hořčíku [12]

Tab. 2 Přehled mechanických vlastností hliníku (20°C), dle [2], [2]

Pevnost v tahu	pod 100 MPa
Mez kluzu	20 MPa
Tvrdost	20-30 HB
Modul pružnosti v tahu	70 000 MPa
Tažnost	30%

Z hlediska chemických vlastností je nutno zmínit, že hliník a jeho slitiny jsou pokryty tenkou vrstvou oxidu Al_2O_3 . Tato vrstva je kompaktní, dobře lne k povrchu a tvoří se na vzduchu během několika minut. Tloušťka oxidické vrstvy na povrchu součástí má za normální teploty tloušťku asi 10 nm. Oxidická vrstva brání hloubkové oxidaci a zajišťuje velmi dobrou odolnost proti povětrnostním vlivům. Tato vrstva není ovšem odolná proti působení kyselin a zásad. Chemická odolnost ve vodných roztocích velmi závisí na pH elektrolytu. Další chemické vlastnosti jsou již uvedeny v tabulce 1.

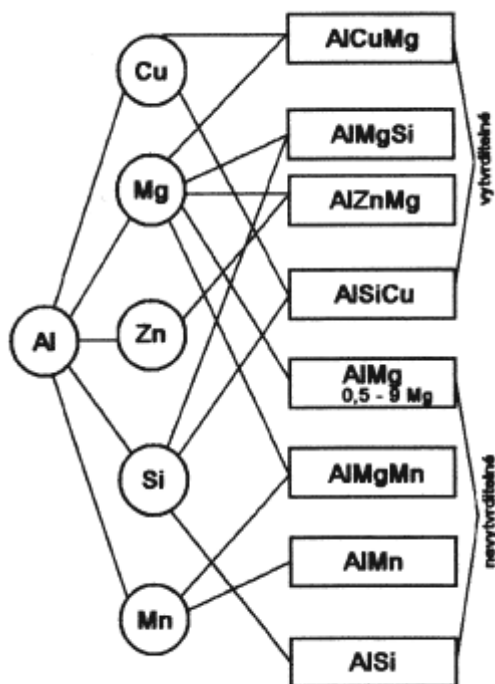
Ze slévárenského hlediska patří mezi významné vlastnosti poměrně vysoká měrná tepelná kapacita a vysoké skupenské teplo tání. Jejich důsledkem je vysoká energetická náročnost na roztavení hliníkových slitin.

2.2 Slitiny hliníku [2]

Jak již bylo uvedeno, čistý hliník je pro konstrukční účely nevyhovující vzhledem k jeho špatným mechanickým vlastnostem. To je nejvýznamnějším důvodem pro výrobu slitin hliníku s jinými kovy, které se použijí na konstrukční díly.

Přísadové prvky zvyšují mechanické (v určitém rozmezí daném typem slitiny) a zlepšují technologické vlastnosti. Výsledné vlastnosti slitin jsou dány množstvím a vzájemnou kombinací přísadových prvků. Slitiny hliníku jsou tvořeny základním prvkem (Al), dále hlavním přísadovým prvkem, vedlejším přísadovým prvkem a doprovodným prvkem. Jejich kombinací se tvoří celá řada slitin hliníku. Podle počtu přísadových prvků (mimo doprovodných) se slitiny dělí na:

- Binární – obsahují pouze základní a hlavní přísadový prvek;
- ternární – kromě základního a hlavního prvku obsahují jeden vedlejší přísadový prvek;
- vícesložkové – obsahují několik vedlejších přísadových prvků.



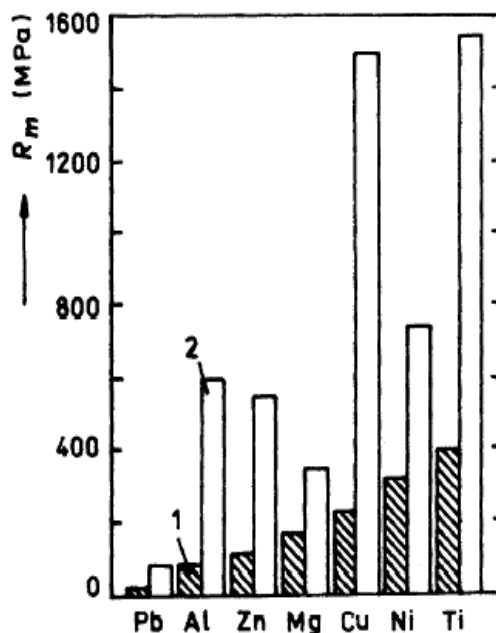
Obr. 3 Schéma tvorby slitin hliníku [7]

Hlavní přísadové prvky jsou takové prvky, které jsou rozhodující pro určení vlastností slitin a spolu se základními prvky vymezují typ slitiny. Jejich obsah bývá po hlavním prvku druhý nejvyšší. Hlavními přísadovými prvky bývají křemík, měď a hořčík, spíše vyjíměčně také zinek nebo mangan. Podle nich dělíme slitiny hliníku do těchto základních typů:

- Slitiny Al – Si - siluminy;
- slitiny Al – Cu - duraluminium;
- slitiny Al – Mg - hydronalium.

Vedlejší přísadové prvky jsou takové prvky, které příznivě ovlivňují některé vlastnosti daného typu slitiny (např. zvyšují mechanické vlastnosti, zlepšují obrobiteľnost, ovlivňují strukturu kovu). Jsou také důležité z hlediska tepelného zpracování, nebo kompenzují nepříznivý účinek některých doprovodných prvků. Vedlejších prvků může být ve slitině i několik najednou. Prvek, který nejvýznamněji ovlivňuje slitiny určitého typu, rozděluje slitiny do skupin, např. u siluminů to mohou být skupiny Al – Si – Cu, Al – Si – Mg, apod.

Na obr. 4 je uvedeno porovnání pevnostních vlastností čistého hliníku a jeho slitin v porovnání s jinými kovy.



Obr. 4 Srovnání pevnosti čistého hliníku (1) a pevnosti jeho slitin (2) v porovnání s jinými kovy [13]

Doprovodnými prvky se označují prvky, které nebyly do slitiny přidány záměrně. Při překročení určité koncentrace obvykle zhoršují mechanické, chemické nebo technologické vlastnosti slitiny a jsou považovány za nečistoty. Působí tak, že buď nepříznivě ovlivňují vlastnosti základního kovu, nebo tvoří vlastní fáze, které mají negativní vliv na vlastnosti slitin. Jejich obsah bývá limitován. Zdrojem doprovodných prvků jsou zejména vsázkové suroviny, nebo se do slitiny dostávají v průběhu tavení z vyzdívky, případně z použitých tavacích přípravků a nářadí. Ale nejvíce se doprovodné prvky dostávají do slitiny při přetavování šrotu.

Vliv jednotlivých přísadových prvků na vlastnosti slitin hliníku je následující [2],[6]
Křemík - je základní přísadový prvek, který výrazně zlepšuje slévárenské vlastnosti – zvyšuje zabíhavost, zmenšuje součinitel stahování při tuhnutí a sklon ke vzniku mikrostaženin, snižuje nebezpečí trhlin a prasklin. Slitiny s nižším obsahem Si (menší podíl eutektika) je vhodné očkovat a slitiny vyšším obsahem křemíku (vyšší podíl eutektika) je vhodné modifikovat (je možné obě metalurgické metody také kombinovat).
Měď - je obvyklá přísada hliníku. Měď zvyšuje pevnost, tvrdost a významně zlepšuje obrobitelnost. Měď ale naopak zhoršuje tvárnost, působí nepříznivě na odolnost proti korozi. Přítomnost mědi ve slitinách hliníku umožňuje zvýšení pevnostních vlastností vytvrzováním. Obsah ve slitinách pro tváření je 6% a ve slitinách pro odlévání max. 12%.

Hořčík - se v malém množství objevuje téměř ve všech slitinách hliníku. Zlepšuje většinou podmínky pro tepelné zpracování a zlepšuje odolnost proti korozi. Obsah ve slitině pro tváření je 8%, slitiny pro odlévání 11%.

Železo - je prvkem, který je obvykle nečistotou. Nepříznivě působí na mechanické vlastnosti. U běžných odlitků se připouští obsah železa do 0,6%. Železo v malém množství nemá prakticky žádný vliv na slévárenské vlastnosti. Při vyšším obsahu zvětšuje sklon ke vzniku trhlin za tepla. Nežádoucími vlivy železa je také zhoršení obrobiteľnosti (při obsahu nad 1,2%) a korozní odolnosti.

Mangan - zlepšuje pevnost, tvárnost a odolnost proti korozi. U slitin určených pro vytvrzování zjemňuje zrna a omezuje jeho růst při ohřevu. Při větší koncentraci zvyšuje křehkost a poněkud zhoršuje slévateľnost slitin. Hlavní úlohou ve slitinách hliníku je kompenzace nepříznivého vlivu železa.

Nikl - slitiny s obsahem 1–2% Ni si zachovávají dobré mechanické vlastnosti i za vyšších teplot. Slitiny s niklem mají i poněkud menší součinitel teplotní roztažnosti. Z tohoto důvodu se používají pro písty a hlavy válců motorů. Slévárenské vlastnosti se s množstvím niklu snižují, nikl však nemá prakticky žádný vliv na obrobiteľnost a korozní odolnost.

Zinek - slitiny s přísadou Zn se vyznačují výbornou pevností, menší houževnatostí, odolností proti korozi a malou tvárností při normální teplotě. Ve slitinách Al-Si nepatří k běžným legurám. Z hlediska technologických vlastností zlepšuje tekutost, resp. zabíhavost a obrobiteľnost.

Titan - nejvýznamnějším vlivem titanu ve slitinách hliníku je jeho očkovací účinek. Vlivy titanu na další vlastnosti souvisí nepřímo s jeho zjemňujícím účinkem. Díky zjemnění primárního zrna se mírně zlepšuje obrobiteľnost, odolnost proti korozi a možnost povrchové úpravy odlitků.

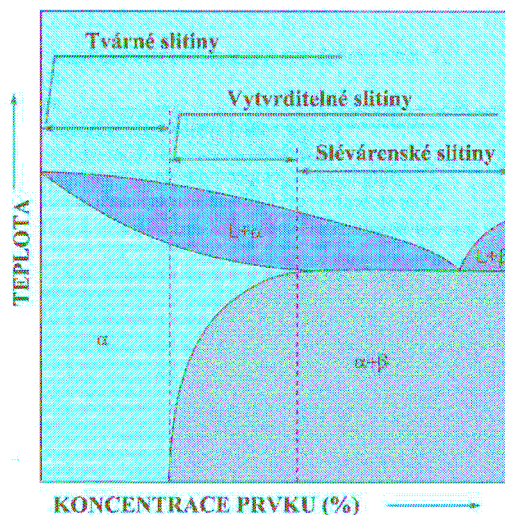
Bor - přítomnost bóru ve slitinách hliníku zjemňuje strukturu. Tento prvek často slouží jako očkovač, které se přidává do taveniny před jejím odléváním.

Chrom - nebývá častou legurou, jeho přítomnost u slitin Al-Mg, Al-Mg-Si a Al-Mg-Zn působí příznivě na jejich vytvrditelnost.

Olovo - jeho přítomnost u slitin hliníku zlepšuje obrobiteľnost. U slitin Al-Cu-Mg může být příčinou vzniku trhlin za tepla v důsledku segregace během krystalizace.

Zirkonium - lze použít jako leguru v množství 0,1-0,3% s cílem získání jemné struktury odlitků ze slitiny typu Al-Zn-Mg. Přispívá k tvorbě jemných precipitátů při vytvrzování těchto slitin.

Jak je obecně známo, slitiny hliníku se nejčastěji dělí dle technologie jejich zpracování, tj. na slitiny hliníku pro odlévání a na slitiny hliníku pro tváření. Na obr. 5 je uveden rovnovážný diagram s částečnou rozpustností obou složek v tuhém stavu. Levá část diagramu, která obsahuje tuhý roztok α , představuje slitiny vhodné pro tváření. Střední část diagramu, blízko eutektickému bodu, představuje slitiny vhodné pro slévání.



Obr. 5 Rozdělení hliníkových slitin [6]

Struktura hliníkových slitin s podeutektickým složením je tvořena homogenním tuhým roztokem $\alpha(\text{Al})$ a eutektikem. Eutektikum je tvořeno tuhým roztokem $\alpha(\text{Al})$ a čistým přísadovým prvkem nebo jeho sloučeninou (intermetalickou fází).

Homogenní tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$ je roztok, v němž atomy přísadového prvku nahrazují v kubické plošně centrované mřížce hliníku jeden nebo více atomů. Přísadové prvky mají jinou velikost atomů než hliník, proto způsobují deformaci původní mřížky. To má za následek nárůst pevnosti slitiny, současně však snížení plastických vlastností. Rozpustnost přísadových prvků v hliníku je nejvyšší při eutektické teplotě a při ochlazování se snižuje. V důsledku snižování rozpustnosti přísadových prvků se může během ochlazování vylučovat fáze přísadového prvku. Snižování rozpustnosti přísadových prvků při chladnutí ztuhlého kovu je vlastností, která umožňuje provádět nejdůležitější způsob tepelného zpracování hliníkových slitin – tzv. vytvrzování. Vytvrzujícím prvkem může být jak hlavní, tak i vedlejší přísadový prvek. Podle schopnosti vytvrzování se slévarenské slitiny hliníku dělí dle [5] a [10] na:

- Nevytvrditelné;
- vytvrditelné.

Nevytvrditelné slitiny hliníku jsou slitiny, které neumožňují tepelné zpracování, tzv. vytvrzování. Ke slitinám, které nejsou vytvrzovány, patří především binární slitiny Al-Mn a Al-Mg. Jsou to slitiny se středními mechanickými hodnotami a dobrou odolností proti korozi. Binární slitiny Al-Mg se nevytvrzují z důvodu, že i malé navýšení pevnosti doprovází velké snížení tažnosti. Slitiny Al-Mn se nevytvrzují z důvodu malé rozpustnosti manganu ve fázi α .

U vytvrditelných slitin hliníku je vytvrzování nezbytnou operací, která podmiňuje jejich další využití. Patří sem zejména slitiny typu Al-Cu-Mg, které mají velmi dobré mechanické vlastnosti, ale sníženou odolnost proti korozi. Dále slitiny Al-Mg-Si, které mají sice nižší mechanické vlastnosti, ale zato lepší korozní odolnost. Mezi další vytvrditelné slitiny patří Al-Zn-Mg a Al-Zn-Mg-Cu.

2.2.1 Slévárenské slitiny hliníku [2],[8]

Slévárenské slitiny bývají slitiny s větším obsahem přísad - jsou heterogenní a v jejich struktuře se objevuje eutektikum. Tyto slitiny mají oproti slitinám jiných kovů celou řadu výhod např. nízkou teplotu tavení, dobrou chemickou stabilitu (odolnost vůči korozi), dobré povrchové vlastnosti odlitku a dobrou slévateľnost. Slévárenské vlastnosti slitin úzce souvisí s jejich intervalem tuhnutí. Nejlepší slévárenské vlastnosti mají slitiny s úzkým intervalem tuhnutí, naopak slitiny se širokým intervalem tuhnutí mají slévárenské vlastnosti špatné. Mezi slévárenské vlastnosti patří:

- Zabíhavost;
- stahování;
- sklon k naplynění;
- sklon k trhlinám a prasklinám;
- smršťování.

Zabíhavost je technologická vlastnost, která charakterizuje schopnost tekutého kovu zaplňovat dutinu formy tak, aby vznikl kvalitní odlitek. Je závislá nejen na vlastnostech odlévané slitiny, ale také na podmínkách odlévání, konstrukci odlitku a na vlastnostech slévárenské formy. Nejlepší zabíhavost vykazují slitiny s úzkým intervalem tuhnutí, naopak slitiny se širokým intervalem tuhnutí mají zabíhavost špatnou.

Ke stahování dochází téměř u všech kovů při tuhnutí. Je to zmenšování rozměrů odlitků vzhledem k formě. Stahování mívá za následek vznik mikroporů, staženin a vnitřních pnutí. K odstranění staženin se využívá nálitků. Slitiny se širokým intervalem

tuhnutí mají sklon vytvářet rozptýlené staženiny, obtížně se nálitkují a odlitky vykazují nižší těsnost.

Smršťování jsou rozměrové změny odlitku, ke kterým dochází po ztuhnutí odlitku, tj. při jeho chladnutí. Při odlévání do kokil je smršťování slitin podstatně menší než při lití do pískových forem.[8]

Sklon k naplynění je charakterizován rozpustností plynů v tekutém stavu. Některé prvky naplynění zvyšují, jiné naopak snižují. Úroveň naplynění taveniny rozhoduje o tvorbě plynových bublin v odlitku.

Sklon k trhlinám a prasklinám. Trhliny se tvoří jen v období intervalu tuhnutí, pokud existují dvě fáze – tekutá a tuhá. Praskliny vznikají za teplot podstatně nižších v důsledku pnutí v odlitku během chladnutí (vlivem nerovnoměrného chladnutí, rozdílem teplot mezi vnějším povrchem a vnitřkem odlitku). Dosahuje-li vnitřní pnutí vysokých hodnot, může dojít k prasknutí odlitku. Sklon ke vzniku trhlin je tím menší, čím menší je interval tuhnutí. Proti vzniku trhlin působí zpomalené chladnutí.

2.2.2 Přehled slévarenských slitin hliníku [2],[6]

Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.2, je základní dělení slévarenských slitin na binární a ternární. Základní binární slitiny jsou soustavy Al-Cu, Al-Mg, Al-Si, Al-Zn. V těchto soustavách tvoří hliník s příslušnými komponentami substituční tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$, který je při dobré tvárnosti a houževnatosti pevnější a tvrdší než čistý hliník. Ternární slitiny jsou slitiny, které byly odvozeny ze základních binárních slitin jako např. Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Si-Cu.

Slitiny typu Al-Si (tzv. siluminy) patří mezi nejrozšířenější slitiny hliníku. Podle obsahu Si jsou rozdělovány na podeutektické (méně než 12% Si), eutektické (kolem 12% Si) a nadeutektické (více než 12%Si). Mají vynikající slévatelnost (výbornou zabíhavost, malý sklon ke vzniku staženin a malý sklon ke vzniku trhlin), velmi dobrou odolnost vůči korozi, ale špatnou obrobitelnost. Tyto slitiny se nevytvrzují z důvodu, že i při rychlém ochlazení se dosáhne malého stupně přesycení a stárnutím se pevnost zvýší jen málo.

Slitiny typu Al-Si-Mg patří mezi vytvrditelné slitiny hliníku a to díky obsahu hořčíku v množství 0,25-0,45%. Při běžné rychlosti ochlazování se hořčík ve slitině vylučuje jako vytvrditelná fáze Mg_2Si . Po precipitačním vytvrzení mají velmi dobré mechanické

vlastnosti. Hodí se pro výrobu složitých a velkých odlitků. Tyto slitiny se vyznačují dobrou slévateľností a odolností vůči korozi a jejich tavná svařitelnost je dobrá. Na druhou stranu mají zhoršenou obrobiteľnost.

Slitiny typu Al-Si-Cu je nejvíce používaným typem slitin hliníku. Patří podobně jako předchozí typ slitin ke slitinám vytvrditelným. Díky přítomnosti mědi dochází k určitému stupni samovolného vytvrzování. Efekt je tím silnější, čím se odlitek rychleji ochlazoval při tuhnutí a tím více vznikl přesycený tuhý roztok. Přítomností mědi se zlepšují slévářenské a mechanické vlastnosti. Slitiny mají také dobrou obrobiteľnost, ale nízkou korozní odolnost.

Slitiny typu Al-Si-Cu-Mg jsou opět díky Cu a Mg vytvrditelné. Vzhledem k vysokému obsahu Si mají vynikající odolnost proti otěru, vysokou tepelnou vodivost a dobré mechanické vlastnosti při vyšších teplotách. Na druhé straně mají sníženou odolnost proti korozi a horší obrobiteľnost.

Slitiny typu Al-Cu patří k tepelně zpracovatelným slitinám, protože měď se ve slitině vylučuje jako vytvrditelná fáze Al_2Cu . Slévářenské slitiny obvykle obsahují 4-5% Cu. Vyznačují se vysokými mechanickými vlastnostmi a velmi dobrou obrobiteľností, ale nízkou korozní odolností a vzhledem k širokému intervalu tuhnutí špatnými slévářenskými vlastnostmi. Velmi dobrých pevnostních vlastností za vyšších teplot lze dosáhnout přidáním Ni a Mg.

Slitiny typu Al-Mg nelze tepelně zpracovávat vytvrzováním. Mají velmi dobrou odolnost vůči korozi především v mořské vodě. Jsou svařitelné a mají také dobrou obrobiteľnost. Nevýhodou těchto slitin je špatná slévateľnost, náchylnost hořčíku k oxidaci v procesu tavení a poměrně špatné mechanické vlastnosti.

Slitiny typu Al-Mg-Si patří k tepelně zpracovatelným slitinám, protože hořčík se při cca 1% vylučuje do sloučeniny Mg_2Si a ta se vylučuje jako intermetalická fáze, která umožňuje provádět vytvrzování. Jsou to slitiny, ve kterých, kromě hořčíku, bývá vždy ještě malé množství manganu, železa, popř. mědi. Obsah hořčíku se pohybuje v rozmezí od 0,4

do 1,2%. Mangan již v malém množství, přibližně do 0,3%, zvyšuje mírně pevnost slitiny, při větším množství naopak pevnost slitiny snižuje.

Slitiny typu Al-Zn patří mezi slitiny samovolně se vytvrzující za studena. Ze slévárenského hlediska mají značný sklon ke vzniku staženin a hlavně velký sklon ke vzniku trhlin. Z technologických vlastností je důležitá hlavně rozměrová stabilita, dobrá odolnost proti korozi a dobrá obrobitelnost. S přísadou Mg jsou obvykle slévárenské vlastnosti lepší než u slitin Al-Cu nebo Al-Mg.

V tab. 3 je uveden přehled některých slévárenských slitin hliníku a způsob jejich značení dle ČSN EN 1706.

Tab. 3 Přehled některých slévárenských slitin hliníku a způsob značení - ČSN EN 1706 [2]

Skupina slitin	Označení slitin	
	Číselné	Chemickými značkami
AlCu	EN AC - 21XXX	EN AC – Al Cu ₄
AlSiMgTi	EN AC – 41000	EN AC – Al Si ₂ MgTi
AlSi ₇ Mg	EN AC – 42XXX	EN AC – Al Si ₇ Mg 0,3
AlSi ₁₀ Mg	EN AC – 43XXX	EN AC – Al Si ₁₀ Mg
AlSi	EN AC – 44XXX	EN AC – Al Si ₁₂
AlSi ₅ Cu	EN AC – 45XXX	EN AC – Al Si ₆ Cu ₄
AlSi ₉ Cu	EN AC – 46XXX	EN AC – Al Si ₉ Cu ₃
AlSi(Cu)	EN AC – 47XXX	EN AC – Al Si ₁₂ Cu
AlSiCuNiMg	EN AC – 48XXX	EN AC – Al Si ₁₂ CuNiMg
AlMg	EN AC – 51XXX	EN AC – Al Mg ₃
AlZnMg	EN AC – 71000	EN AC – Al Zn ₅ Mg

Pozn. : pokud je ve skupině více slitin jsou v tabulce u číselného označení uvedeny křížky

Mechanické vlastnosti slitin jsou závislé zejména na druhu a vlastnostech základní kovové hmoty a na tepelném zpracování. Jemnozrnná struktura zlepšuje všechny mechanické vlastnosti a také řadu technologických vlastností slitin. Z mechanických vlastností se obvykle sleduje pevnost v tahu při normální teplotě, mez kluzu, tažnost a tvrdost.

V tabulce 4 jsou pro porovnání uvedeny mechanické vlastnosti vybraných slévárenských slitin v litém stavu a po vytvrzení. U běžných hliníkových slitin v litém stavu se mez pevnosti v tahu pohybuje v rozmezí 140-250 MPa. Po vytvrzení se zvýší o 30-50 % a mez kluzu se zvýší o 80 %.

Tvrдость slitin Al-Si v litém stavu se obvykle pohybuje v rozmezí 60-80 HB. Vytvrzováním lze dosáhnout zvýšení tvrdosti na hodnoty kolem 100 HB. Tvrдость slitiny Al-Mg je nižší, obvykle kolem 50 HB.

Za zvýšených teplot se mechanické vlastnosti poměrně rychle snižují. Vytvrzené slitiny za těchto teplot svoje vlastnosti rychle ztrácejí a pod působícím napětím dochází k tečení.

Tab. 4 Tabulka mechanických hodnot vybraných slitin dle [7]

Označení slitin číselné chemické		způsob lití	tepelné zpracování	R _m [MPa] min.	R _{p0,2} [MPa] min.	A _{50mm} [%] min.	Tvrдость [HBS] min.
EN AC - 43000	EN AC- <chem>AlSi10Mg(a)</chem>	do písku	F T6	150 220	80 180	2 1	50 75
EN AC - 43200	EN AC- <chem>AlSi10Mg(Cu)</chem>	do písku	F T6	160 220	80 180	1 1	50 75
EN AC - 42000	EN AC- <chem>AlSi7Mg</chem>	do písku	F T6	140 220	80 180	2 1	50 75
EN AC - 45200	EN AC- <chem>AlSi5Cu3Mn</chem>	do písku	F T6	140 230	70 200	1 <1	60 90
EN AC - 42000	EN AC- <chem>AlSi7Mg</chem>	do kokil	F T6 T64	170 260 240	90 220 200	2,5 1 2	55 90 80
EN AC - 45200	EN AC- <chem>AlSi5Cu3Mn</chem>	do kokil	F T6	160 280	80 230	1 <1	70 90
EN AC - 46400	EN AC- <chem>AlSi9Cu1Mg</chem>	do kokil	F T6	170 275	100 235	1 1,5	75 105

Poznámka: F – litý stav, T6 – rozpouštěcí žíhání a umělé stárnutí

2.3 Vytvrzování slitin hliníku [2],[3],[9]

Jak již bylo uvedeno, zvýšení mechanických vlastností lze dosáhnout tepelným zpracováním. Úkolem tepelného zpracování slévárenských slitin hliníku je kromě zlepšení mechanických vlastností, snížit vnitřní pnutí po ochlazení odlitku a získat rozměrovou

stabilitu. Lze říci, že mezi tepelným zpracováním slitin pro tváření a slitin pro odlévání není zásadní rozdíl. Tepelné zpracování slitin hliníku můžeme rozdělit do dvou základních skupin:

- Žíhání;
- vytvrzování.

Zatímco žíháním se má dosáhnout ustáleného rovnovážného stavu, vytvrzování je pochod, kterým se dají podstatně zvýšit mechanické vlastnosti odlitků.

Proces vytvrzování byl objeven v roce 1906 A. Wilmem a nyní je nejdůležitějším způsobem tepelného zpracování hliníkových slitin. Tímto tepelným zpracováním se dosahuje podstatného zvýšení meze pevnosti, meze kluzu a tvrdosti, ale tažnost se mírně snižuje. Příčinou je to, že tepelným zpracováním dostaneme jinou strukturu s jinými mechanickými vlastnostmi, než je ta, kterou dostaneme při chladnutí odlitků ve slévárenské formě. K tomuto tepelnému zpracování se nehodí všechny typy slitin používané ve slévárenství, ale jen ty, které vykazují změnu rozpustnosti některých přísadových prvků v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$ během chladnutí (např. Al-Cu, Al-Si-Mg, Al-Si-Cu).

Vytvrzování se skládá z několika technologických úkonů (ohřev na homogenizační teplotu, rychlé ochlazení a stárnutí), které na sebe navazují a vzájemně souvisí do té míry, že jejich dílčí provedení ovlivňuje často rozhodujícím způsobem konečný výsledek. Technologický postup tohoto tepelného zpracování je podobný kalení a popouštění ocelí, avšak mechanismus vytvrzování je poněkud odlišný.

Odlitky v surovém, tepelně nezpracovaném stavu, mají určité mechanické a fyzikální vlastnosti, které jsou dány jednak chemickým složením materiálu odlitku a jednak charakterem jejich vnitřní struktury. Tyto odlitky, které ztuhly ve slévárenské formě běžným způsobem, jsou výchozím polotovarem pro vytvrzování. Při tuhnutí ať už v pískové nebo kovové formě se přísadové prvky vylučují v podobě rovnovážných intermetalických fází, např. Mg_2Si , Al_2Cu atd. Takto vyloučené fáze jsou ale poměrně hrubé a mají nepříznivý vliv na vlastnosti slitiny, zejména snižují houževnatost.

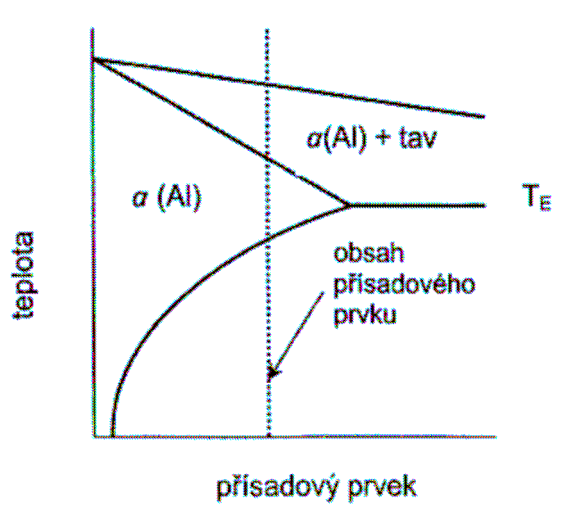
Cílem vytvrzování je zpětné rozpuštění těchto fází do homogenního tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$ a jejich následné vyloučení v podobě koherentních a semi-koherentních útvarů, které způsobují zpevnění slitiny.

2.3.1 Fyzikálně metalurgická podstata vytvrzování [2],[4],[5],[6]

Změna rozpustnosti je základním předpokladem pro vznik přesyceného tuhého roztoku, jehož další přeměna vede ke změně vlastností. Slitiny hliníku lze vytvrzovat tehdy, pokud jsou splněny následující podmínky [11]:

- Základní kov a legující přísady tvoří tuhé roztoky s částečnou rozpustností v tuhém stavu;
- rozpustnost legujících přísad v tuhém roztoku se s teplotou mění;
- rychlým ochlazováním je potlačené vylučování rovnovážných fází (např. Mg_2Si , Al_2Cu) z přesycených tuhých roztoků;
- stárnutí probíhá při teplotě, při které se vylučuje rovnovážná fáze v rovnovážném stavu v dostatečném množství.

Podmínkou pro vytvrzování je přítomnost přísadového prvku, který má dostatečně výraznou změnu rozpustnosti v tuhém roztoku. Takovými prvky jsou zejména Cu a Mg. Obsah těchto prvků ve slitině musí být vyšší, než je jejich rozpustnost při normální teplotě, ale nižší, než je maximální rozpustnost v tuhém roztoku $\alpha(Al)$ při eutektické teplotě, viz obr. 6.



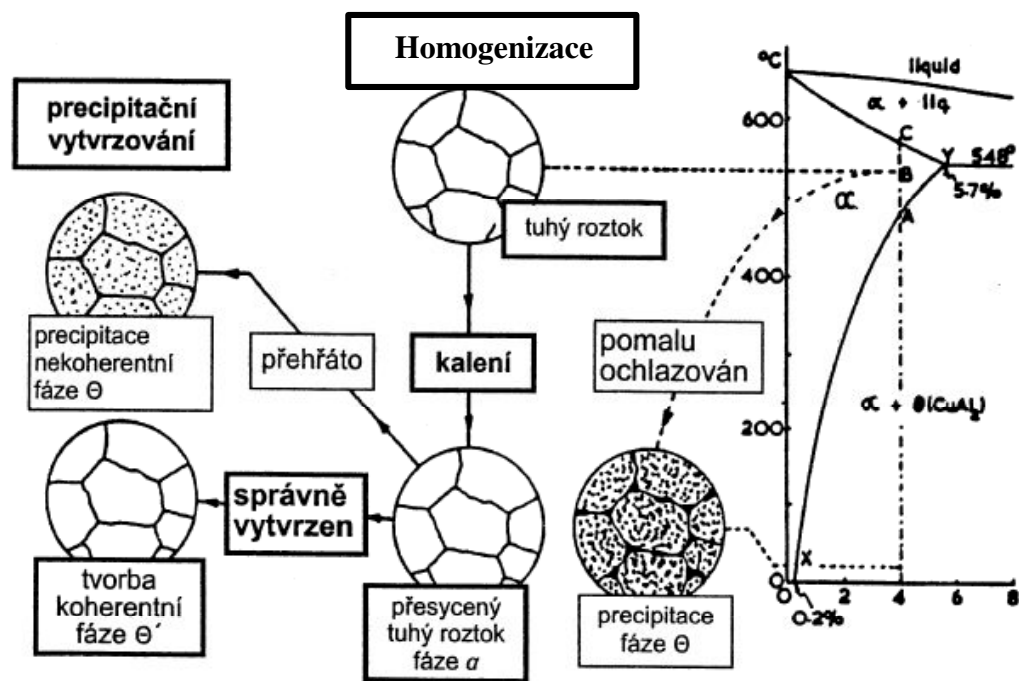
Obr. 6 Změna rozpustnosti přísadového prvku v hliníku [2]

Princip vytvrzování spočívá v tom, že se rychlým ochlazením z teploty maximální rozpustnosti tuhého roztoku získá přesycený tuhý roztok, z něhož se pak při normální nebo zvýšené teplotě vylučují velmi jemné strukturní složky. Ty značně zvyšují pevnost i tvrdost slitiny, ovšem na úkor plastických vlastností. Vznikem přesyceného tuhého roztoku nedochází ještě k vytvrzujícímu účinku, naopak mechanické vlastnosti slitiny v tomto

okamžiku jsou horší, než byly před jejím zpracováním. Tím se liší vytvrzování hliníkových slitin od kalení ocelí.

Jak již bylo uvedeno v úvodu kap. 2.3, vytvrzování je složeno z několika etap [8]:

- Ohřev slitiny na teplotu odpovídající existenci tuhého roztoku nebo intermetalické fáze;
- Výdrž na této teplotě za účelem vzniku tuhého roztoku nebo intermetalické fáze → získává se homogenní tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$;
- rychlého ochlazení zhomogenizované struktury → výsledkem je přesycený tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$;
- rozpad přesyceného tuhého roztoku vede teprve k vytvrzovacímu účinku tz. stárnutí → dochází k tvorbě precipitátu a zpevnění struktury.

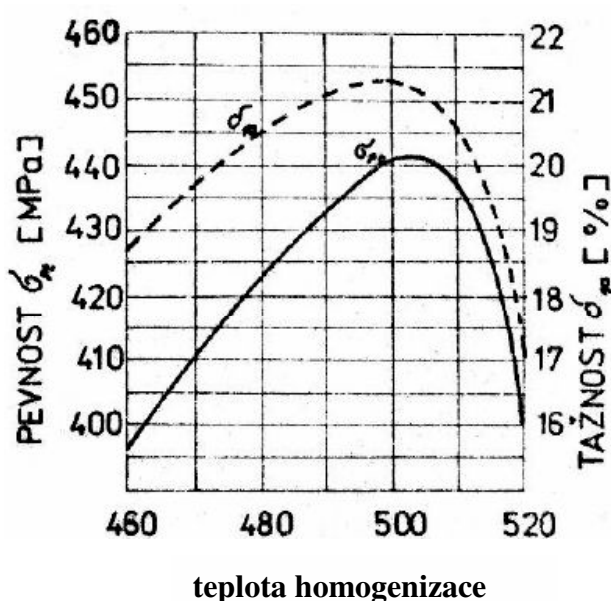


Obr. 7 Teplotní průběh vytvrzování slitiny Al – Cu [2]

Ohřev na homogenizační teplotu je prováděn jako přípravná operace před následujícím ochlazením. Provádí se při teplotách nad křivkou změny rozpustnosti a dochází při něm k rozpuštění intermetalických fází obsahujících vytvrzující přísadové prvky. Homogenizačnímu ohřevu je nutné věnovat značnou péči. Zvláště u slitin, u nichž se množství přísadového prvku blíží maximální rozpustnosti v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$, se volí homogenizační teplota co nejvyšší. Překročení optimální teploty vede k natavení slitin na hranicích zrna a ke zhrubnutí zrna. Naopak nižší teplota, než je optimální, způsobuje

nedokonalé rozpuštění segregátu a vytvrzováním se nedosáhne očekávaných vlastností. V praxi se teplota homogenizačního ohřevu volí 10 – 15°C pod eutektickou teplotu a tuto hodnotu je nutné udržovat v úzkých tolerancích (± 3 až 5 K).

Doba homogenizačního ohřevu musí být dostatečně dlouhá, aby došlo k dokonalému rozpuštění segregovaných fází vytvrzujícího prvku. Časová prodleva na homogenizační teplotě se může pohybovat v širokém intervalu, závisí hlavně na disperzitě výchozí struktury a tloušťce stěny odlitku (u jemnozrné struktury a tenkostěnných odlitků postačuje kratší doba homogenizace). Obvykle je doba homogenizace cca 3 až 6 hodin.



Obr. 8 Vliv teploty rozpouštěcího žíhání na mechanické vlastnosti slitiny AlCu4Mg1 po vytvrzení [6]

Po skončeném homogenizačním ohřevu následuje **ochlazení**, jehož účelem je získat za normální teploty přesycený tuhý roztok, tedy zabránit segregaci fází, které tuhý roztok přesycují. U slitin hliníku se provádí obvykle do vody 20°C teplé. Tvarově komplikované výrobky, u nichž mohou vznikat deformace vlivem tepelných pnutí po rychlém ochlazení, se ochlazují ve vodě 40 až 50°C teplé, nebo v některých případech až 80°C, ale s následným dochlazením ve studené vodě.

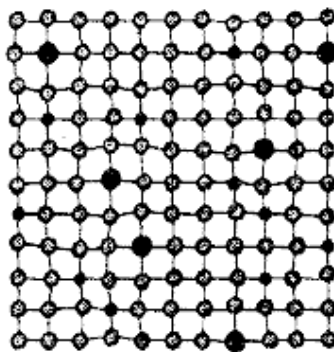
Ochlazení z homogenizační teploty do teploty maximálně 150 až 200°C musí být velmi rychlé. Doba mezi vyjmutím odlitku z pece a ponořením do vody by neměla překročit 10 až 20 s. Jestliže není ochlazení odlitku po vyjmutí z pece dostatečně rychlé, může dojít částečně k segregaci na hranicích zrn a k podstatnému snížení výsledných

vlastností. Rychlost ochlazování závisí na typu a chemickém složení slitiny. Po rychlém zachlazení je struktura slitiny tvořena přesyceným tuhým roztokem $\alpha(\text{Al})$, který je poměrně měkký a tvárný.

Precipitační vytvrzování (stárnutí) [2],[3],[4],[5]

Stárnutím se označuje proces, při kterém dochází k postupnému rozpadu nestabilního přesyceného tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$, viz obr. 9, získaného rychlým ochlazením. K tomuto jevu může docházet za zvýšených teplot, ale i za normálních teplot. Čas, za který se rozpad přesyceného tuhého roztoku uskuteční, závisí především na chemickém složení slitiny. Lze říci, že od doby, kdy byl získán přesycený tuhý roztok, až po dobu, kdy jsou získány požadované vlastnosti, dochází nepřetržitě k vnitřním (substrukturním) změnám a v důsledku toho ke změnám mechanických, fyzikálních i korozních vlastností. Průběh stárnutí je ovlivněn nejen přísadami, ale i přímíšeninami, které mohou ovlivnit rozpustnost přísad a tím i průběh stárnutí.

Tyto změny nastávají přímo po rychlém zachlazení z teploty homogenizace. Pevnostní vlastnosti slitin vzrůstají, ale tvárnost a houževnatost obvykle mírně klesají a mění se také některé fyzikální vlastnosti.

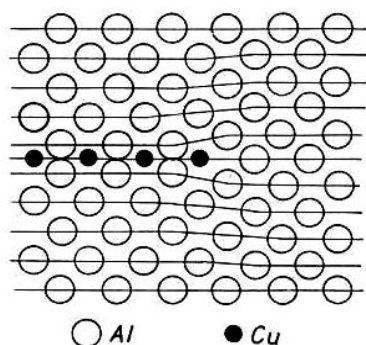


Obr. 9 Schématické znázornění přesyceného tuhého roztoku [6]

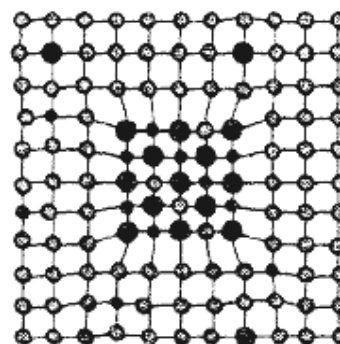
Existuje několik různých teorií, které tento proces vysvětlují. Nejstarší teorie vysvětluje změny, které v tuhém roztoku při vytvrzování probíhají tzv. **precipitací**. Precipitací se rozumí vylučování složky, kterou je tuhý roztok přesycen, v podobě velmi jemné disperze nové fáze, která se vylučuje v celém objemu krystalů tuhého roztoku.

Další teorií vysvětlující změny, ke kterým dochází při vytvrzování, je tzv. **teorie koherentnosti**.

V první fázi stárnutí dochází v přesyceném tuhém roztoku k rozsáhlému difúznímu pohybu atomů přísadového prvku, čímž vznikají oblasti s jeho vyšší koncentrací. Oblast, ve které se soustředily tyto atomy, má plošný charakter. Její tloušťka při přirozeném stárnutí je jen 2 až 3 atomové vrstvy. V místě koncentračních rozdílů probíhá nukleace nové fáze. U slitin Al-Si-Mg je touto fází Mg_2Si , u slitin Al-Cu je to CuAl_2 , u slitin se zinkem je to fáze MgZn_2 a u slitin s niklem fáze NiAl_3 . Jejich růstem vznikají koherentní precipitáty, které se označují jako Guinier – Prestonovy zóny. Jejich uspořádání je destičkové. Rychlost tvorby zón v podstatě závisí na koncentraci legujícího prvku. Na obr. 10 je patrné, že mřížková konstanta v těchto pásmech je rozdílná od mřížkové konstanty základního tuhého roztoku. Krystalová mřížka těchto pásem však zůstává koherentní s mřížkou základního tuhého roztoku, viz obr. 11. Koherence znamená, že tyto oblasti jsou součástí krystalické mřížky tuhého roztoku (nedochází k oddělení obou mřížek), jehož mřížku poněkud deformují a vyvolávají v ní vnitřní pnutí. Tato pnutí jsou příčinou zvýšení pevnosti a tvrdosti slitiny.

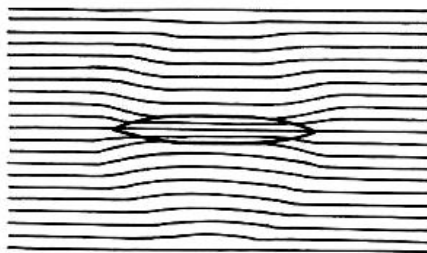


Obr. 10 Schématické znázornění pásma GP I [6]



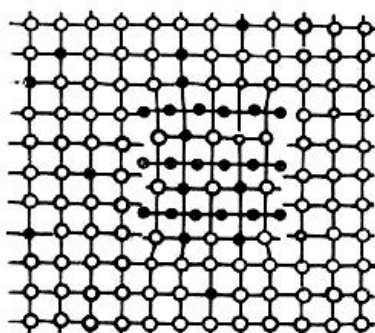
Obr. 11 Schématické znázornění koherentního precipitátu [6]

V dalším průběhu stárnutí, tj. při zvýšení teploty nad optimální hodnotu a s rostoucím časem, se koherentní precipitáty dále zvětšují a jejich počet se snižuje, ale přesto mají rozhodující vliv na zvýšení pevnosti a tvrdosti i na změnu fyzikálních vlastností. Vznikají vícevrstvé destičkové útvary tvořené několika meziatomovými, pravidelně se střídajícími vrstvami přísadového prvku. Tyto koherentní precipitáty jsou označovány jako Guinier-Prestonova pásma II., viz obr. 12.



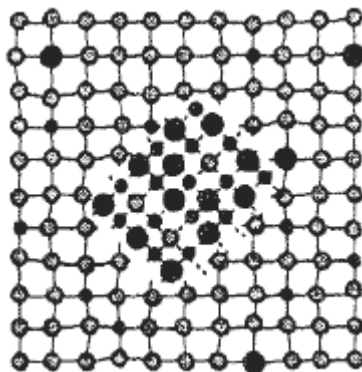
Obr. 12 Schématické znázornění pásma GP II [6]

V dalším průběhu se koherence postupně ztrácí, zóny začínají tvořit samostatné útvary, které přestávají být krystalicky spojeny s původním přesyceným tuhým roztokem. Zpočátku se jedná o tzv. semikoherentní částice ještě částečně spojené s tuhým roztokem, viz obr. 13. Tento proces je ještě doprovázen zvýšením tvrdosti a pevnosti. Obvykle slitiny po vytvrzení obsahují koherentně až semikoherentně vyloučenou vytvrzující fázi.



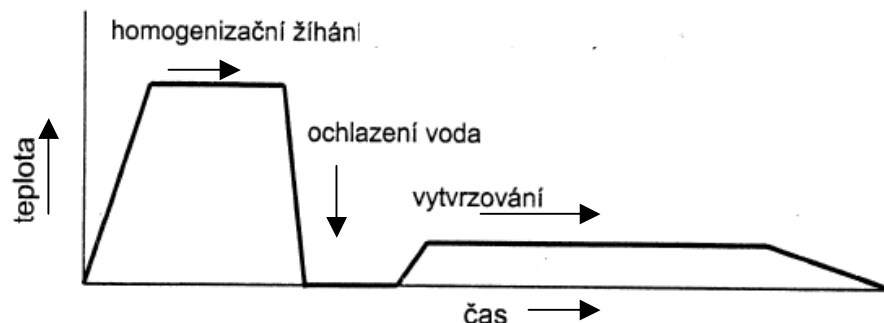
Obr. 13 Schématické znázornění částečně koherentního precipitátu [6]

Dalším stádiem vytvrzování je postupná ztráta koherence. Nekoherentní vytvrzující fáze již nemá krystalickou vazbu na tuhý roztok a dochází ke snižování pevnosti a tvrdosti, viz obr. 14. Tento stav se nazývá **přestárnutí slitiny**. Důvodem přestárnutí je příliš vysoká teplota, nebo příliš dlouhá doba vytvrzování. V dalším průběhu by docházelo k úplné ztrátě koherence a k vyloučení rovnovážných fází přísadového prvku, což by se projevilo snížením pevnosti a tvrdosti proti maximu, ale za současného zvýšení tažnosti. Tohoto jevu se někdy v praxi záměrně využívá (tepelné zpracování označené jako T64).



Obr. 14 Schématické znázornění nekoherentního precipitátu [6]

Jak již bylo uvedeno, může k precipitačnímu vytvrzování hliníkových slitin docházet za normální teploty nebo za teplot zvýšených a to podle pohyblivosti atomů vytvrzujícího prvku. Pokud probíhá při normální teplotě, je označováno jako **přirozené** (např. slitiny Al-Cu-Mg). Pokud probíhá za zvýšené teploty 100 až 200°C, jedná se o **umělé** (např. Al-Zn-Mg). Schématické znázornění umělého stárnutí je na obr. 15. Je samozřejmé, že při umělém stárnutí probíhá precipitace podstatně rychleji než při stárnutí přirozeném, ale maximální dosažená pevnost je menší než po přirozeném stárnutí.



Obr. 15 Schéma tepelného zpracování při umělém stárnutí [2]

Maximální tvrdosti a pevnosti po vytvrzování se dosahuje v oblasti koherentních precipitátů (GP I a GP II), popřípadě na počátku vylučování částečně koherentní fáze. Zvyšování teploty stárnutí obvykle snižuje výslednou tvrdost a současně posouvá celý průběh precipitace ke kratším časům.

2.3.2 Průmyslové uplatnění precipitačního vytvrzování

Klasickým příkladem vytvrzovaných odlitků jsou disky osobních automobilů, které se vyrábí nízkotlakým litím. Disky kol se většinou odlévají ze slitiny AlSi7Mg a dále se

tepelně zpracovávají dle postupu označeným jako T6. Technologický postup tepelného zpracování je následující:

- První fází je homogenizační ohřev na teplotu 530°C a výdrž na této teplotě po dobu 6-10 hodin;
- ve druhé fázi následuje zachlazení do vody o teplotě v rozmezí 40-70°C po dobu 1-3 minuty;
- v poslední fázi se provede umělé stárnutí při teplotě 125°C po dobu 2-4 hodiny.

Dalšími příklady vytvrzovaných odlitků jsou např. hlavy motoru osobních automobilů (např. slitina AlSi6Cu4) a motocyklů odlévaných gravitačním způsobem. Dále např. bloky motoru ze slitiny AlSi9Cu3(Fe), které jsou odlévány vysokotlakým litím do vakuované formy.

3. ZÁVĚR

Bakalářská práce pojednává o problematice související s tepelným zpracováním hliníkových slitin – s precipitačním vytvrzováním.

Čistý hliník nemá pro praktické použití ve slévárenství vhodné užité vlastnosti. V slévárenské praxi se více využívají jeho slitiny, které patří, vedle litin, k nejvíce využívaným konstrukčním materiálům. Ve snaze zvýšit jejich mechanické vlastnosti při zachování co nejvyšší houževnatosti se provádí tepelné zpracování. Nejvýznamnějším způsobem tepelného zpracování slitin hliníku je vytvrzování.

Ne každá slitina hliníku je vytvrditelná. Nutnou podmínkou pro vytvrzování slitiny je přítomnost přísadového prvku, který vytváří intermetalickou fázi. U slévárenských slitin hliníku jsou těmito fázemi Al_2Cu , Mg_2Si , popř. MgZn_2 . Vytvrditelné slitiny hliníku, u kterých je vytvrzování nezbytnou operací, jsou především slitiny např. Al-Si-Cu, Al-Si-Mg, Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg. Nevytvrditelné jsou především binární slitiny Al – Mn a Al – Mg.

Vytvrzování je doprovázeno výraznými změnami pevnostních vlastností slitiny, a proto má v technické praxi velký význam i přesto, že při něm klesá tažnost. Tento jev je způsoben změnou struktury (parametru mřížky základního tuhého roztoku) po tepelném zpracování, která je odlišná od struktury vznikající při samovolném tuhnutí odlitku ve slévárenské formě.

Při tepelném zpracování je nutné dle příslušné slitiny zabezpečit technologický postup tak, aby proběhly všechny etapy procesu, které jsou nutné pro zajištění vytvrzení.

Precipitační vytvrzování se provádí hlavně u odlitků, které jsou vystaveny velkému mechanickému namáhání, např. disky kol atd.

4. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Michna, Š. a kol.: Encyklopedie hliníku. ADIN, 2005, Přerov.
- [2] Roučka, J. : Metalurgie neželezných slitin, VUT Brno, 2004
- [3] Černoch, S. :Strojně technická příručka 2. svazek, SNTL, Praha 1968
- [4] Vetiška A. a kol.: Teoretické základy slévárenské technologie, 2. vydání, SNTL/ALFA, Praha 1974
- [5] Píšek, F., Jeníček, L., Ryš, P. : Nauka o materiálu I, 2.vydání, AKADEMIA, 1973.
- [6] www.benjamin.ic.cz/hlinik_slitiny.pdf
- [7] Ptáček, L. : Slitiny hliníku na odlitky, Slévárenství XLVII, 1999, č.1, str. 1-13
- [8] Nová, I.: Teorie slévání II., TUL, 2007, Liberec
- [9] <http://www.tzs.kmm.zcu.cz/TZSprcelk.pdf>
- [10] Macek K., Janovec J., Jurčí P., Zuna P.: Kovové materiály, ČVUT, 2006, Praha
- [11] Blibruchová D., Tillová :Zlívárenské zliatiny Al–Si, Žilinská univerzita v Žilině, 1. vydání, 2005
- [12] Pluhař J. : Strojírenské materiály, 3. vydání, SNTL, Praha, 1981
- [13] <http://www.tzs.kmm.zcu.cz/nezelez2.pdf>

PŘÍLOHY

Příloha č. 1: Označování režimu tepelného zpracování

Příloha č. 2: Značení slitin hliníku na odlitky

Příloha č. 1

Způsob tepelného zpracování se značí písmenem T a jednou nebo dvěma číslicemi(vyjímkou je označení F a O)

F.....v litém stavu

O.....žhánání na odstranění vnitřního pnutí nebo stabilizační žhánání. Typické teploty žhánání do 340°C/2–3 hodiny, ochlazení na vzduchu.

T2.....po ochlazení ze zvýšené teploty tváření a přirozeném stárnutí

T3.....po rozpouštěcím žhánání, tváření za studena a přirozeném stárnutí

T4.....po rozpouštěcím žhánání a přirozeném stárnutí

T5.....umělé stárnutí při relativně nízkých teplotách bez předchozího homogenizačního žhánání – pro stabilizaci tvaru a rozměrů, zlepšení obrobitelnosti a odstranění vnitřního pnutí. Teploty 205–260°C/7–10 hodin.

T6.....vytvrzování – skládá se z homogenizačního žhánání, rychlého ochlazení a precipitačního vytvrzení za tepla. Teploty 145–160°C/3–5 hodin.

T7.....vytvrzení jako u stavu T6 ale s přestárnutím. Stabilizace mechanických vlastností a rozměrů odlitků, menší pevnost, ale vyšší tažnost. Teploty 190–225°C/4–6 hodiny

T8.....po rozpouštěcím žhánání, tváření za studena a umělém stárnutí.

T9.....po rozpouštěcím žhánání, umělém stárnutí a tváření za studena

Některé příklady z podskupin výše zmíněných typů tepelného zpracování:

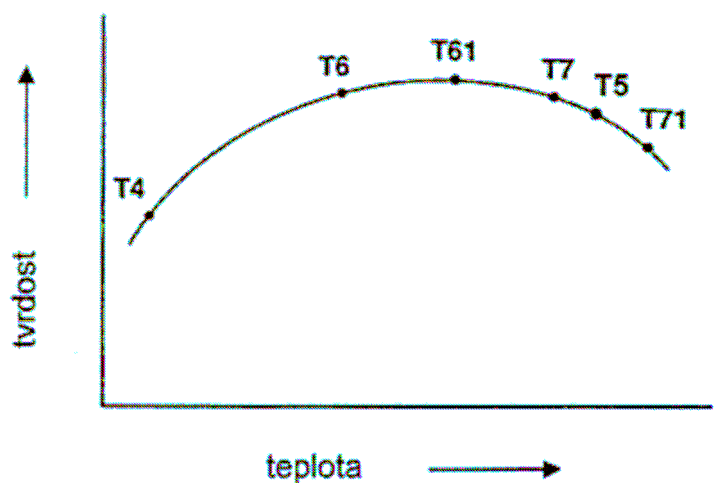
T64.....vytvrzování na maximální houževnatost

T61.....vytvrzování pro dosažení maximální pevnosti a tvrdosti. Snížení houževnatosti

T71.....přestárnutí do stabilního stavu. Oproti T7 zvýšení teplotní stability, odolnosti proti korozi pod napětím, ale snižuje se pevnost.

T3510.....po rozpouštěcím žhánání, uvolnění vnitřního pnutí vypnutím řízené velikosti trvalé deformace (1 – 3 % pro lisované tyče, profily a trubky) a přirozeném stárnutí. Po vypnutí se tyto výrobky dále nevyrovnávají.

T7351.....Po rozpouštěcím žhánání, uvolnění vnitřního pnutí řízenou velikostí trvalé deformace (0.5 – 3 % pro plechy, 1.5 – 3 % pro desky, 1 – 3 % pro tyče, 1 – 5 % pro výkovky a válcovaný kruh) a umělém přestárnutí k dosažení nejlepší odolnosti proti korozi za napětí. Po vypnutí se tyto výrobky dále nevyrovnávají.



Obr. 16 Závislost tvrdosti slitiny na teplotě žíhání při zpracování dle T4 až T7 [2]

Zdroj: [1],[2]

Příloha č. 2

Slévárenské slitiny hliníku jsou v ČR od roku 2000 normovány podle evropské normy ČSN EN 1706, která nahradila dřívější normu ČSN 4243XX a 4245XX. V českých slévárnách se velmi často používá značení podle původní německé normy DIN 1725. Podle ČSN EN 1706 se slitiny značí buď číselně, nebo chemickými značkami.

1. Číselné značení slitin

Číselně se slitina označuje písmeny EN AC a pětímístným číslem, ve tvaru

EN AC-XXXXX

První číslice charakterizuje hlavní přísadový prvek:

- 2 – slitiny Al – Cu
- 4 – slitiny Al – Si
- 5 – slitiny Al – Mg
- 7 – slitiny Al – Zn

Druhá číslice udává skupinu slitin a prakticky se využívá pouze u slitin Al – Si.

Třetí číslice je pořadové číslo ve skupině.

Čtvrté a páté číslice jsou 0.

2. Označení slitin chemickými značkami

Za úvodním EN AC-Al se uvádí další přísadové prvky a to v pořadí od hlavního přísadového prvku k vedlejším prvkům. Ty jsou seřazeny podle obsahu v sestupném pořadí. Při množství legury nad 1% se procentuální množství udává číslem za značkou příslušného prvku. Při obsahu prvku do 1% se číslo za značkou prvku nepíše.

Zdroj: [2]

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum odevzdání: 5.6. 2009

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act no. 121/2000 Coll. Applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully Aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am Aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expense invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 5.6.2009

Signature